



応用物理学会秋季学術講演会 注目講演プレスリリース

2023年 9月 11日

量子ポイントコンタクトを用いたGaAs2次元電子と単一テラヘルツ光共振器との超強結合状態の電氣的観測
Electrical Detection of Ultrastrong Coupling between Two-Dimensional Electrons and a Single Terahertz Optical Resonator by Using a Quantum Point Contact

究極の光と物質の相互作用「超強結合」 単一の光共振器で検出

東大生研¹，東大ナノ量子機構²
○黒山和幸¹，權晋寛²，荒川泰彦²，平川一彦^{1,2}

【発表概要】

- ・量子コンピュータなど、将来的な量子情報処理への応用において利点のある、単一の光共振器による光と物質の超強結合状態を電氣的に検出する独自の方法を開発
- ・オンチップテラヘルツ（THz）スプリットリング共振器（SRR）と量子ポイントコンタクト（QPC）による実験で、超強結合状態を示す反交差信号を検出

光と物質の相互作用における超強結合という現象が研究者の注目を集めている。超強結合を実現する系の一つとして、テラヘルツ（THz）と呼ばれる周波数帯域に共鳴周波数を持つスプリットリング共振器（SRR）とGaAs半導体2次元電子系との量子結合系が提案され、これまで活発に研究が進められてきた。先行研究では、そのような結合系の超強結合状態は、主に、光共振器の大規模な配列を作製し、光測定による手法で検出されてきた。しかし、量子情報処理などへの応用を視野に入れると、単一の光共振器の超強結合検出が求められている。東京大学生産技術研究所の黒山和幸氏らによる研究グループは、単一の光共振器を使用し、超強結合状態を電氣的に検出する方法を開発。「オンチップテラヘルツSRR」と「GaAs2次元電子系に作製した量子ポイントコンタクト」（QPC）によるシンプルな実験系において、SRRと2次元電子との超強結合状態を、QPCの光電流を測定することによって直接観測した。量子情報処理技術の進化を加速させる可能性を秘めた研究である。

【詳細】

究極の光と物質の相互作用「超強結合」

光と物質の相互作用は「量子光学」において中心的な概念として研究が進められてきた。量子光学は、微視的な視点から光を捉える、つまり量子力学的な立場から光と物質との相互作用を解明する学問だ。量子光学では、光を光子の集まりとして捉え、光と物質間のエネルギーの交換を探求するという側面がある。これまでに量子光学の基礎研究によってもたらされた知見は、レーザーや光通信などに関連する、現代では欠かすことのできない技術の基盤を確立してきた。その量子光学において新たなフロンティアとなっているのが、光と物質における「超強結合」と呼ばれる相互作用である。

「固体の量子情報を光に移すことによって通信をする、固体の量子状態を光で制御するなど、この領域ではさまざまな研究がなされてきました。量子情報の観点から、単一の原子と共振器の結合が実現されてきましたが、近年、物質の集団励起を用いることで、物質系と共振器の結合強度が非常に大きくなる、『超強結合』と呼ばれる特殊な量子状態が発見されました。超強結合の状態においては、従来の光と物質の結合量子系を説明するモデルが破綻することから、新しい物理現象が見出されるのではないかと期待されています」と東京大学生産技術研究所の黒山和幸氏は話す。

光と物質における結合の強さは「共振器量子電磁力学」において用いられる「ラビ周波数」で説明される。ラビ周波数とは、光と物質が相互作用する際のエネルギーの「遷移周波数」のことである。具体的には、光と物質の結合系において、共振器への光子の生成と物質の励起とが交互に起きるが、その状態遷移の周波数のことを指す。

原子など単一の物質系に対して、光と物質の結合は、ラビ周波数と結合系のエネルギーの散逸レートを比較して、前者が小さい場合には「弱結合」、逆に大きい場合には「強結合」と呼ばれて分類される。一方で、超強結合状態は、異なる基準で分類がなされており、ラビ周波数が共振器の共鳴周波数に匹敵する結合状態のことを指す。さらに、近年では、共振器の共鳴周波数を超える結合強度を実現した実験結果も報告され始めている。

「超強結合状態では共振器と物質が結合しているだけで、物質の量子状態が変わってしまうというような不思議なことが起こります。従来の弱結合や強結合で実現されてきた光と物質の結合強度では、基本的に外部から励起をしないと結合の状態が見えないのですが、超強結合では、励起をすることなく、もともとの物質系の基底の状態が変化してしまうといった一見不思議な現象が起こり得るのです。これら超強結合状態で発現する不思議な現象を解明することが、新しい原理に基づく物質制御につながるのではないかと研究が活発化しています」と黒山氏は話す。

単一光共振器の結合状態を電氣的に検出

超強結合を実現する系はすでに先行研究によって示されており、テラヘルツ (THz) 帯 (※1) に共鳴周波数を持つオンチップ光共振器と、AlGaAs/GaAs (ヒ化アルミニウムガリウム/ヒ化ガリウム) ヘテロ構造 (※2) に蓄積した、2次元電子の「サイクロトロン励起 (※3)」との結合であり、この結合量子状態は「ランダウポラリトン」と呼ばれている。

ランダウポラリトンの超強結合状態は、これまで主に大規模な光共振器の配列を作製し、そこにテラヘルツ電磁波を照射し、光透過測定することによって観測されてきた。しかし、量子情報処理などへの応用の観点から、個々の光共振器の超強結合状態を独立に検出する実験技術の実現が期待されてきたが、その試みは非常に限られている。

「これまでも従来の光透過測定の手法を応用して単一のオンチップ光共振器の超強結合状態を観測した先行研究はありますが (※4)、光学系が特殊かつ複雑であり、量子コンピュータデバイスなどへの将来的な応用を考えると、集積化の面で難しいものでした。そこで私たちは、光透過測定ではなく、電氣的に検出することで、単一光共振器と電子系の超強結合状態を捉えたいと考えました」 (黒山)

黒山氏は、「オンチップテラヘルツ (THz) スプリットリング共振器」 (SRR) をGaAs2次元電子系基板の上に作製し、SRRのすぐそばに「量子ポイントコンタクト」 (QPC) を設置した実験デバイスを作成した (図1)。ここにテラヘルツ電磁波を照射すると、2次元電子のサイクロトロン励起が得られ、そのSRRとの結合状態であるランダウポラリトンが生じる。このとき、QPCによって電流変化 (光電流) を測定することによって、SRRと2次元電子のコヒーレント相互作用 (テラヘルツ電磁波と物質との相互作用) を、電氣的に観測することができるという。

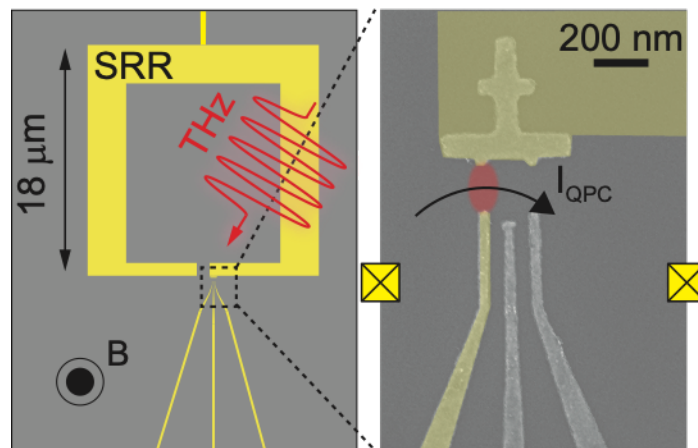


図1 (左) 測定したQPCとSRRとの結合系試料。(右) QPC近傍の走査型電子顕微鏡像。QPCはSRRと左端のスプリットゲート (黄色) の間の赤く色づけされた領域に形成されている。黒い十字は2次元電子との電氣的なコンタクトを示す。2次元電子層は基板の表面から100 nm程度下に存在している。

「この実験は、2次元電子の流れを制御し、測定するという非常にシンプルな作戦です。SRRが共鳴励起されると、共振器のギャップに強いテラヘルツ電場が現れます。さらに、その近くにQPCを設置することで、2次元電子の流れが制限され、必ず共振器のギャップの近傍を流れる状態になります。これによって伝導する全ての2次元電子がSRRの強いテラヘルツ電場を感じ、SRRと超強結合するので、その結合状態をQPCの電流信号として捉えようという作戦です」（黒山）

黒山氏らがQPCの光電流スペクトルの磁場依存性を測定した結果、2次元電子のサイクロトロン励起とSRRの共鳴モードの間には「反交差信号」が現れたという（図2）。反交差信号は、2次元電子とSRRとの間で共鳴的なエネルギーの交換が起きていることを示す。反交差という名前の通り、スペクトル上での2つの信号が、お互いに避け合うような振る舞いとして現れる。そして黒山氏らがその結合強度を評価すると、超強結合領域にあることがわかった。黒山氏らが単一の光共振器の超強結合状態を電氣的に検出した瞬間だった。「単一の共振器における超強結合が検出できれば、光共振器による新奇かつ高度な電子物性の制御技術や、さらに、量子ビットの新しい読み出し技術として量子コンピュータへの応用など、さまざまな量子技術への応用が可能であると考えています」と黒山氏は話す。今後この知見が量子情報処理技術をはじめとする量子技術の進化を加速していくことが期待される。

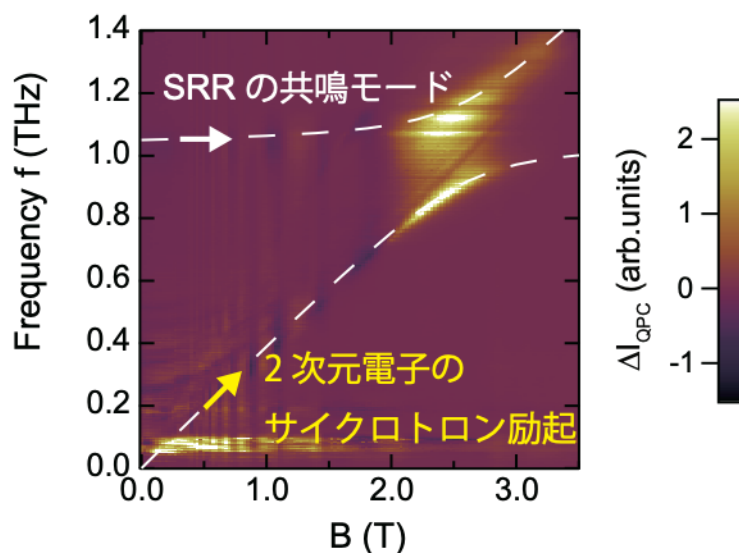


図2 QPC形成時の光電流スペクトルの外部磁場依存性。グラフ右上部に明るい色で現れているのがSRRと2次元電子の結合状態を示す反交差信号。白破線は計算されたランダウポラリトンの励起エネルギーの磁場依存性。

※1 **テラヘルツ帯** 周波数がテラ（ 10^{12} ）ヘルツ（Hz）の領域である電磁波のこと

※2 **ヘテロ構造** 組成元素が異なる固体を接合した構造

※3 **サイクロトロン励起** 速度を持った電子などの荷電粒子に磁場を印加すると、粒子に対してローレンツ力が働く。このローレンツ力に起因した回転運動のことをサイクロトロン運動と呼ぶ。低温・高磁場においては、2次元電子のサイクロトロン運動が量子化し、サイクロトロン周波数のエネルギー間隔で離散化した量子準位が形成され、この量子準位をランダウ準位と呼ぶ。このランダウ準位間の光励起をサイクロトロン励起(もしくはサイクロトロン共鳴)と呼ぶ。

※4 Rajabali, S., Markmann, S., Jöchl, E. et al. An ultrastrongly coupled single terahertz meta-atom. Nat Commun **13**, 2528 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29974-2>